

Физика частиц: на пороге новых открытий...

Дмитрий Горбунов

gorby@ms2.inr.ac.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ
КОМПЛЕКС

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Кафедра физики частиц и космологии, Физфак МГУ

23 октября 2012

План

- 1 Физика частиц и космология: открытия за последние 20 лет
- 2 “Наши” Нобелевские премии за следующие 20 лет...

План

- 1 Физика частиц и космология: открытия за последние 20 лет
- 2 “Наши” Нобелевские премии за следующие 20 лет...

“Наши” Нобелевские премии за 20 лет

- 1992: to Georges Charpak "for his invention and development of particle detectors, in particular the multiwire proportional chamber"
- 1993: jointly to Russell A. Hulse and Joseph H. Taylor Jr. "for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"
- 1995: "for pioneering experimental contributions to lepton physics" jointly with one half to Martin L. Perl "for the discovery of the tau lepton" and with one half to Frederick Reines "for the detection of the neutrino".
- 1998: fractional charge excitations
- 1999: jointly to Gerardus 't Hooft and Martinus J.G. Veltman "for elucidating the quantum structure of electroweak interactions in physics"

“Наши” Нобелевские премии за 20 лет

- 2001: Bose-Einstein condensate
- 2002: divided, one half jointly to Raymond Davis Jr. and Masatoshi Koshiha "for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos" and the other half to Riccardo Giacconi "for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources"
- 2003: theory of superconductors and superfluids
- 2004: jointly to David J. Gross, H. David Politzer and Frank Wilczek "for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"
- 2005: coherence in scattering

“Наши” Нобелевские премии за 20 лет

- 2006: jointly to John C. Mather and George F. Smoot "for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"
- 2008: one half awarded to Yoichiro Nambu "for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics the other half jointly to Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa "for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"
- 2011: one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"

Элементарные частицы и взаимодействия между ними

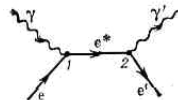
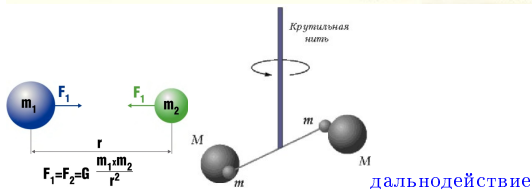
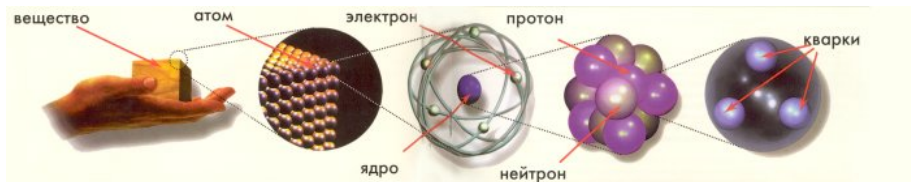


Рис. 2.

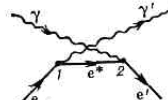
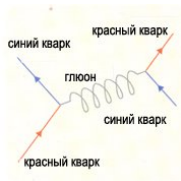


Рис. 3.



10^{-13} см

короткодействие

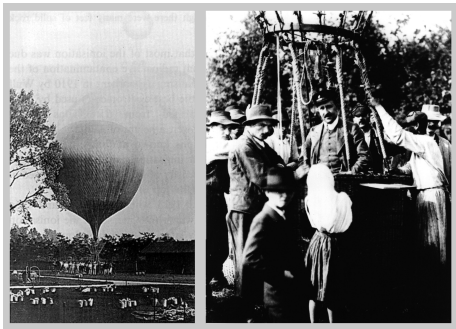


10^{-16} см

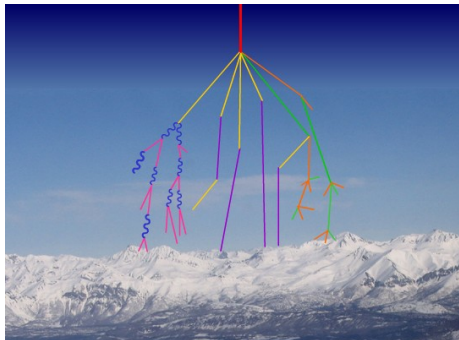


100 лет физике частиц: космические лучи !

Открытие: Виктор Гесс, 1912г.



- Спонтанный электрический ток в газах
- Наблюдался даже в свинцовой камере
- Ток растёт с высотой! ↗5300м
- Эффект не от Солнца!



- 1932г. открыт позитрон e^+ “анти”
- 1937г. открыты мюоны $\mu^+ \mu^-$ и их распад 2-е поколение
- 1947г. открыты π -мезоны адроны, множественное рождение
- 1955г. открыты K -мезоны и нейтральные гипероны “странность”

Three Generations of Matter (Fermions) spin 1/2

	I	II	III
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
name →	Left up Right	Left charm Right	Left top Right
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ Left down Right	104 MeV $-\frac{1}{3}$ Left strange Right	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ Left bottom Right
	0 eV 0 Left electron neutrino Right	0 eV 0 Left muon neutrino Right	0 eV 0 Left tau neutrino Right
	0.511 MeV -1 Left electron Right	105.7 MeV -1 Left muon Right	1.777 GeV -1 Left tau Right
Leptons			

0
0
g
gluon

0
0
 γ
photon

91.2 GeV
0
Z⁰
weak force

80.4 GeV
 ± 1
W[±]
weak force

>114 GeV
0
0
H
Higgs boson

spin 0

Теоретические премии по СМ

За цвет и три поколения

2008: one half awarded to Yoichiro Nambu "for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics the other half jointly to Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa "for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature

За конфайнмент в сильных взаимодействиях

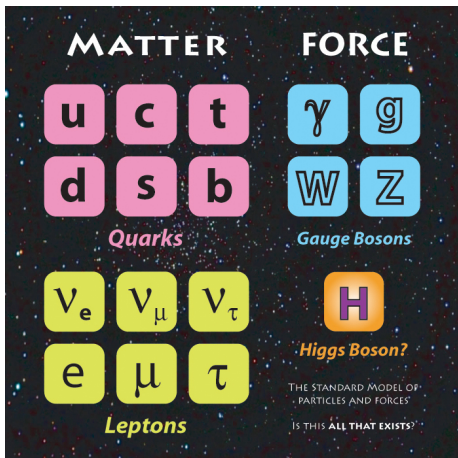
2004: jointly to David J. Gross, H. David Politzer and Frank Wilczek "for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction

Самосогласованность квантово-полевого описания теории со

спонтанно-нарушенной калибровочной симметрией (хиггсовский механизм)

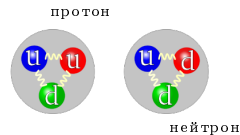
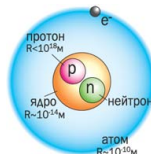
1999: jointly to Gerardus 't Hooft and Martinus J.G. Veltman "for elucidating the quantum structure of electroweak interactions in physics

Элементарные частицы и взаимодействия между ними

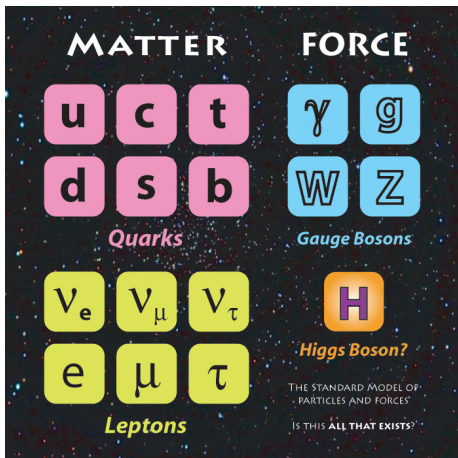


1 2 3 ← поколения

- Почему столь различные массы???
- Почему 2- и 3-го поколений нет в повседневной жизни?



Элементарные частицы и взаимодействия между ними

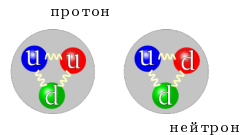
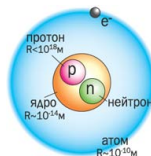


1 2 3 ← поколения

$$m_d - m_u \approx 5 m_e, \quad m_n - m_p \approx 3 m_e$$

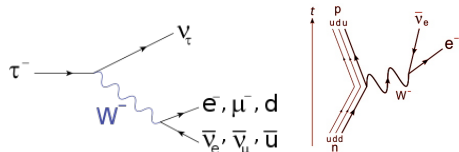
долгожитель: мюон $\tau_\mu \sim 10^{-6} \text{ с}$

- Почему столь различные массы???
- Почему 2- и 3-го поколений нет в повседневной жизни?



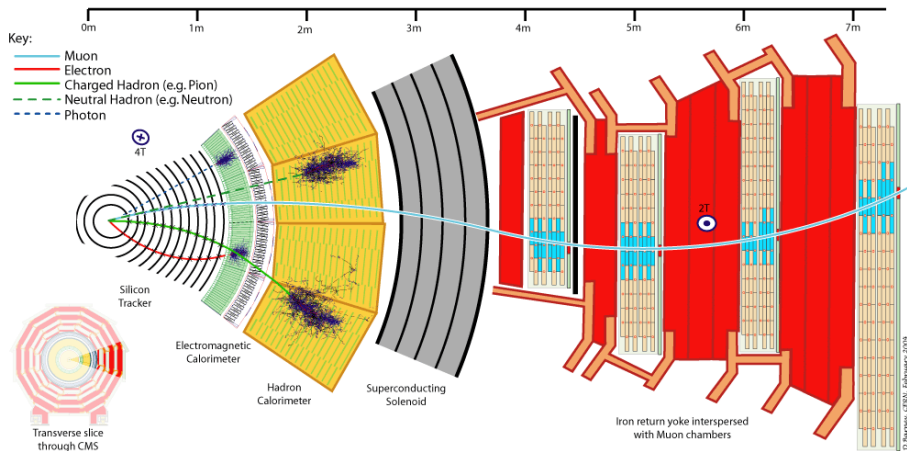
Спасибо

слабым взаимодействиям!



Детектирование частиц: 1992 to Georges Charpak

"for his invention and development of particle detectors, in particular the multiwire proportional chamber"



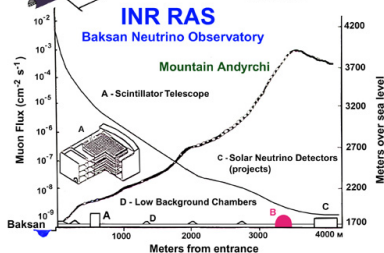
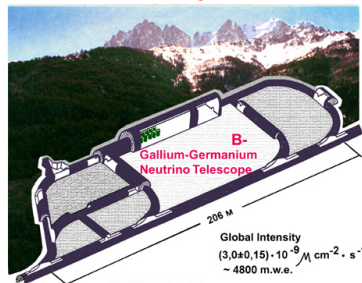
Премии за нейтрино

- 1992: to Georges Charpak "for his invention and development of particle detectors, in particular the multiwire proportional chamber"
- 1995: "for pioneering experimental contributions to lepton physics" jointly with one half to Martin L. Perl "for the discovery of the tau lepton" and with one half to Frederick Reines "for the detection of the neutrino"
- 2002: divided, one half jointly to Raymond Davis Jr. and Masatoshi Koshiba "for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos" and the other half to Riccardo Giacconi "for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources"

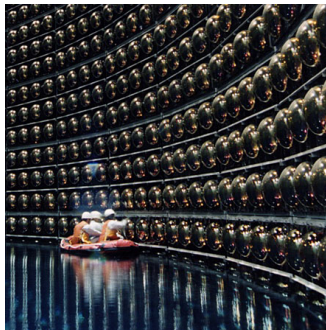
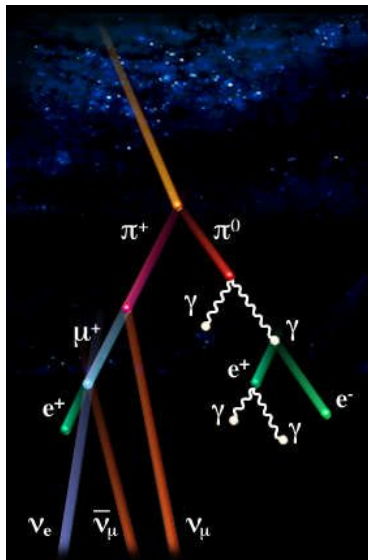
Осцилляции солнечных нейтрино: $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$

Солнце: $p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$

Земля: ${}^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$

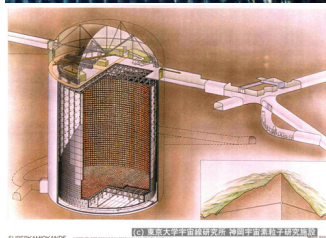


Осцилляции атмосферных нейтрино: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$



Черенковский
свет от e и μ
($v_{\text{частицы}} < c$ в среде)

Поток $_{\mu} \uparrow < \text{Поток}_{\mu} \downarrow$

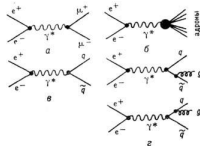


Поток $_e \uparrow = \text{Поток}_e \downarrow$

Проверки Стандартной модели

- распады частиц:
- рассеяния частиц:

$$\mu \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\mu, Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



Фундаментальные частицы

масса — заряд — спин	u	c	t	γ
К	up	charm	top (truth)	фотон
В	первый	оверзавский	истинный	
А	4.8 МэВ	1.6 МэВ	171.2 ГэВ	0
Р	1/2	1/2	1/2	1
К	d	s	b	глюон
Н	down	strange	bottom (beauty)	
Н	нижний	странный	прекрасный	
Л	5.12 МэВ	1.37 МэВ	15.5 МэВ	91.2 ГэВ
Э	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z^0
Н	электронное	мюонное	тау-	р-бозон
Т	нейтрона	нейтрона	нейтрона	
О	8.31 МэВ	186.7 МэВ	1.777 ГэВ	96.4 ГэВ
Н	e	μ	τ	$W^\pm$
М	электрон	мюон	тау-лептон	в-бозон

Три поколения фермионов

Проверки предсказаний СМ

Проверки предсказаний её мотивированных обобщений

Регулярно обновляемая достоверная информация

<http://pdg.lbl.gov>

Премии по астрофизике и космологии

За возможность проверки гравитации

1993: jointly to Russell A. Hulse and Joseph H. Taylor Jr. "for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"

За анизотропию СМВ

2006: jointly to John C. Mather and George F. Smoot "for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"

За ускоренное расширение (тёмную энергию)

2011: one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"

Основные представления о Вселенной: расширяется

Доплеровское “покраснение” света

$$L \propto a(t)$$

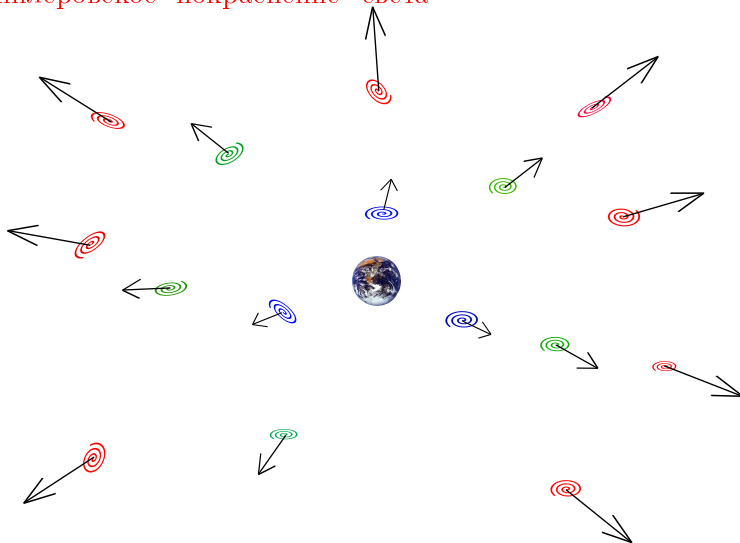
$$n \propto a^{-3}(t)$$

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

параметр
Хаббла

закон
Хаббла

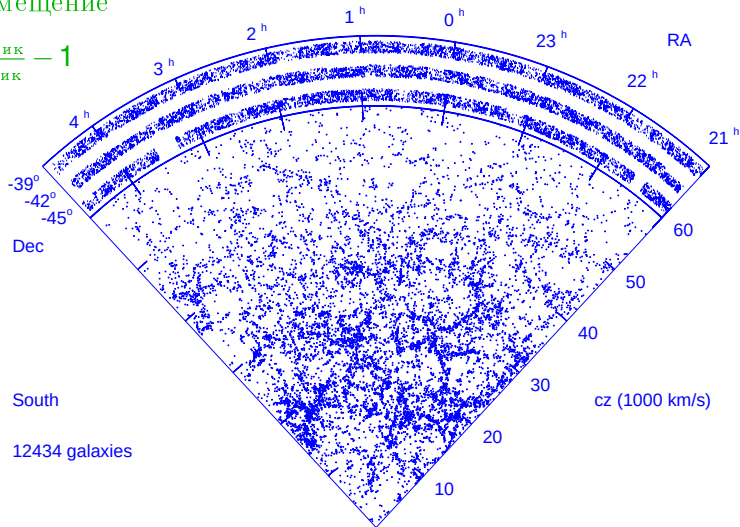
$$H(0)r = v_r$$



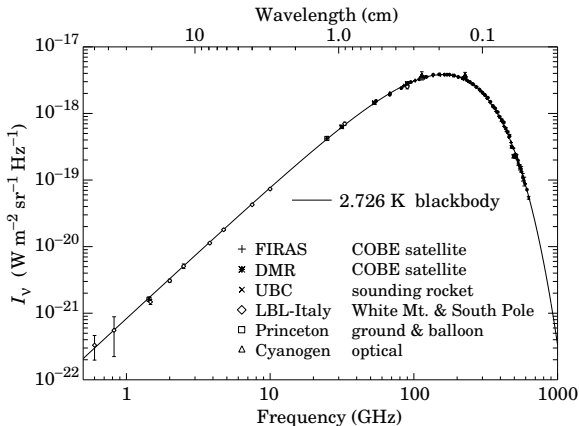
Наша Вселенная: однородна и изотропна

красное смещение

$$z \equiv \frac{\lambda_{\text{приёмник}}}{\lambda_{\text{источник}}} - 1$$



Вселенная заполнена “горячими” фотонами



$$T_0 = 2.726 \text{ K}$$

и спектр и
концентрация
равновесны

$$n_\gamma = 411 \text{ cm}^{-3}$$

Измерение $a(t)$ даёт состав современной Вселенной

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - a^2(t) \Delta \vec{x}^2$$

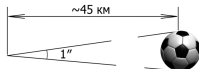
Как мы его проверяем?

Измеряя расстояние L до объекта!

Изменяется закон распространения света

- Измеряя угловой размер θ объекта известного размера d

$$\theta = \frac{d}{L}$$



однотипные галактики

- Измеряя угловой размер $\theta(t)$ соответствующий известно как изменяющемуся размеру $d(t)$

$$\theta(t) = \frac{d(t)}{L}$$

- Измеряя яркость объекта J заданной светимости F

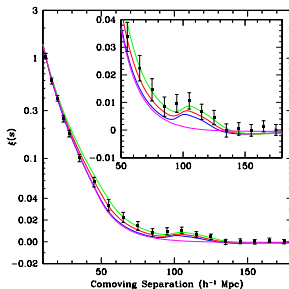
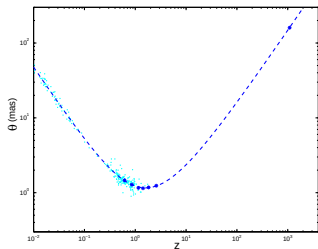
$$J = \frac{F}{4\pi L^2}$$

“стандартные свечи”

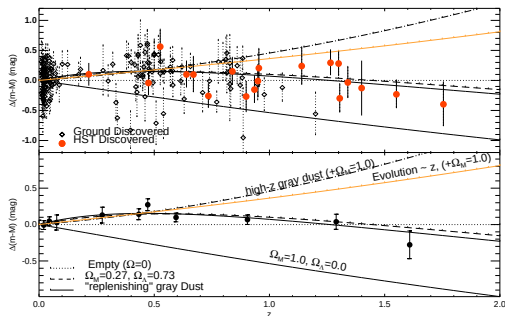


В расширяющейся Вселенной все эти законы модифицируются

Результаты “измерений расстояний”



$$\Delta(m-M) = 5 \log \frac{r_{ph}}{r_{ph}(\Omega_c = 0.8, \Omega_M = 0.2)}$$



Роль тёмной материи в образовании структур

- Реликтовое излучение не совсем изотропно.

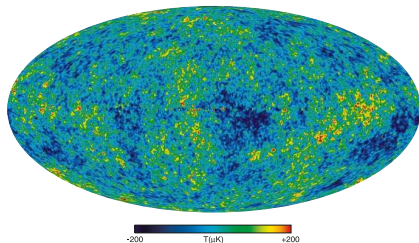
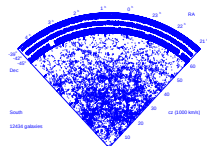
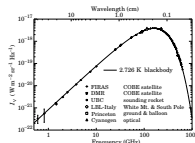
- 1 Движение Земли относительно РИ

$$\frac{\Delta T_{\text{диполь}}}{T} \sim 10^{-3}$$

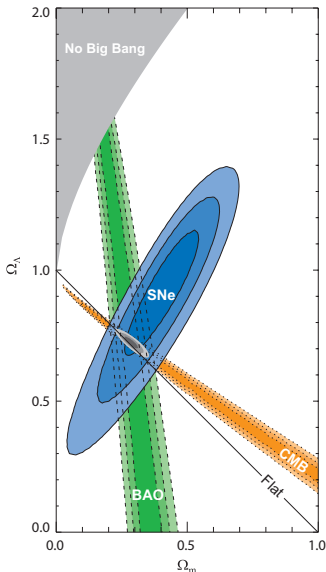
- 2 Есть более сложная анизотропия!

$$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-4} - 10^{-5}$$

- Были неоднородности вещества $\Delta \rho / \rho \sim \Delta T / T$ в эпоху рекомбинации — образования водорода
- Гравитационная (джинсовская) неустойчивость системы покоящихся частиц $\Rightarrow \Delta \rho / \rho \nearrow \Rightarrow$ галактики
- Одни барионы не успели бы! После рекомбинации они “сваливаются” в гравитационные ямы, образованные тёмной материей.



Данные из космологии



- оценка массы в галактиках, скоплениях и других структурах
- поправки к закону Хаббла : связь между красным смещением и кривыми блеска для “стандартных свеч” (SNe Ia)
- анизотропия РИ, распространённость структур (BAO, и др.)

$$\rho_{\text{энергии}}^{\text{плотность}}(t_0) \equiv \rho_c \approx 0.53 \times 10^{-5} \frac{\text{ГэВ } c^2}{\text{см}^3}$$

вклад РИ:

$$\Omega_\gamma \equiv \frac{\rho_\gamma}{\rho_c} = 0.5 \times 10^{-4}$$

Вклад барионов (водород, гелий):

$$\Omega_B \equiv \frac{\rho_B}{\rho_c} = 0.046$$

Вклад нейтрино:

$$\Omega_\nu \equiv \frac{\sum \rho_{\nu_i}}{\rho_c} < 0.01$$

Вклад тёмной материи:

$$\Omega_{DM} \equiv \frac{\rho_{DM}}{\rho_c} = 0.23$$

Вклад тёмной энергии:

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c} = 0.73$$

План

- 1 Физика частиц и космология: открытия за последние 20 лет
- 2 “Наши” Нобелевские премии за следующие 20 лет...

Элементарные частицы и взаимодействия между ними

THE STANDARD MODEL				
	Fermions			Bosons
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon
				Force carriers
				Higgs* boson

*Yet to be confirmed

Source: AAAS

Что будет интересно?

- Бозон Хиггса!
- Нейтринный сектор!

Возможные премии

THE STANDARD MODEL

Force carriers

Higgs^{*}
boson

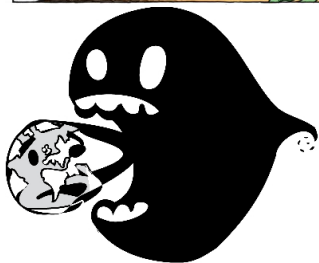
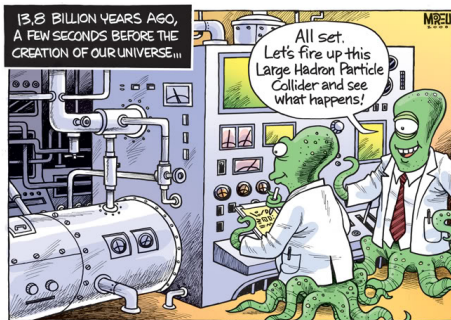
Что будет интересно?

- Бозон Хиггса!
- Нейтринный сектор!

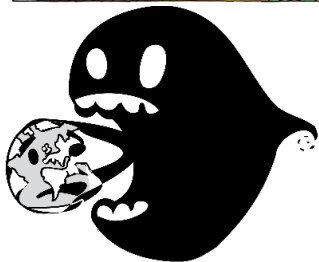
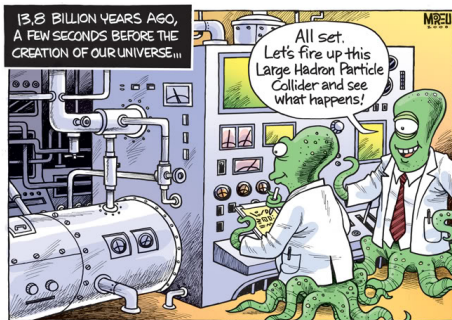
Возможные премии

- За предсказание частицы: бозон Хиггса
- За хиггсовский механизм: . . . XX лет
- Нейтринные осцилляции: вакуум и вещество (Солнце)
- Определение масс нейтрино (2013?)

LHC в главных цифрах



LHC в главных цифрах



Достигнуто в pp столкновениях

- $E_{pp} = 8 \text{ ТэВ}$
- $\int \mathcal{L}_{pp} dt \sim 15 \text{ фбарн}^{-1}$

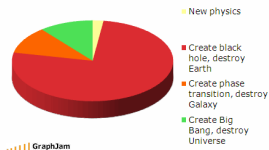
Планируется достичь

- $E_{pp} = 14 \text{ ТэВ}$
- $\mathcal{L}_{pp} = 100 \text{ фбарн}^{-1} \text{ год}^{-1}$
- $\sim 10^9 \text{ } pp\text{-столкновений в секунду}$

NB:

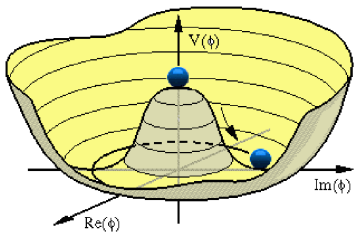
$$E_{pp} \nearrow \Rightarrow \mathcal{L}_{pp} \nearrow$$

Popular LHC expectations



Механизм Хиггса: спонтанное нарушение

$$SU(3)_s \times SU(2)_w \times U(1)_Y \longrightarrow SU(3)_s \times U(1)_{em}$$



$$H : (0, 2, 1) \longrightarrow \langle H^\dagger H \rangle = \frac{v^2}{2}$$

$$\mathcal{L}^{self} = \mathcal{D}_\mu H^\dagger \mathcal{D}^\mu H - \lambda \left(H^\dagger H - \frac{v^2}{2} \right)^2$$

$$\mathcal{D}_\mu H \equiv \left(\partial_\mu - ig \frac{\tau^a}{2} V_\mu^a - ig' \frac{Y_H}{2} A_\mu \right) H$$

унитарная калибровка: $H = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v}{\sqrt{2}} + \frac{h}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$

Как проверить роль бозона Хиггса?

унитарная калибровка: $H = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v}{\sqrt{2}} + \frac{h}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$

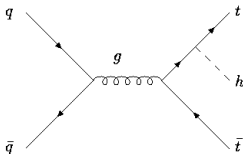
$$\begin{aligned} \mathcal{D}_\mu H^\dagger \mathcal{D}^\mu H &\rightarrow \frac{g^2}{4} h^2 |W_\mu^-|^2 + \frac{g^2 + g'^2}{8} h^2 Z_\mu Z^\mu \\ &+ \frac{g^2}{2} v h |W_\mu^-|^2 + \frac{g^2 + g'^2}{4} v h Z_\mu Z^\mu \\ Y_f H \bar{f} f &\rightarrow Y_f h \bar{f} f / \sqrt{2} = \frac{m_f}{v} h \bar{f} f \end{aligned}$$

Численно:

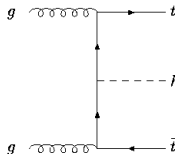
$$g \approx 0.5, g' \approx 0.3, Y_f = 10^{-6} - 10^{-2}, Y_b \approx 1/60, Y_t \approx 0.6$$

- 1 Новая (5-я) короткодействующая сила:
Юкавский потенциал между массивными частицами!
- 2 Унитарность в $WW \rightarrow WW$
- 3 Унитарность в $f\bar{f} \rightarrow WW$

Перспектива: Проверка механизма получения масс



$h\bar{t}t$:

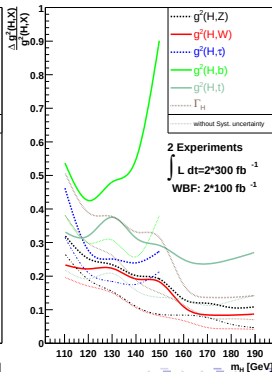
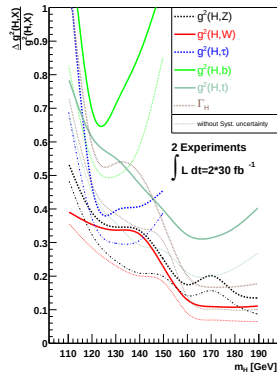


hWW :

$h \rightarrow W^+ W^-$

hZZ :

$h \rightarrow ZZ$



Перспектива: Проверка механизма спонтанного нарушения электрослабой симметрии

h^3 , h^4 :

ТОЛЬКО

h^*hh : $pp \rightarrow hh + \dots$

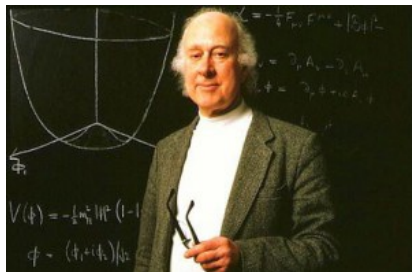
$$-1.1 < \Delta\lambda_{hhh} < 1.6$$

LHC (14 TeV), $\mathcal{L}_{pp} = 600 \text{ фб}^{-1}$

$$-0.62 < \Delta\lambda_{hhh} < 0.74$$

SLHC, $\mathcal{L}_{pp} = 6000 \text{ фб}^{-1}$

$$\Delta\lambda_{hhh} \equiv \lambda/\lambda_{\text{SM}} - 1$$



Космология ограничивает сумму масс нейтрино

Вклад нейтрино:

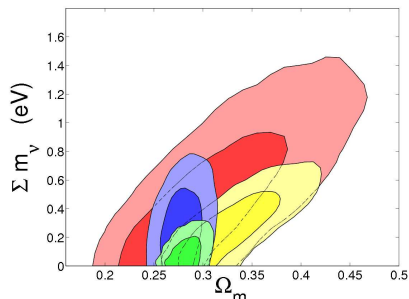
Начало формирования структур

Гравитационные потенциалы в эпоху
рекомбинации

Поляризация CMB

Поздняя эволюция структур

Расширение Вселенной



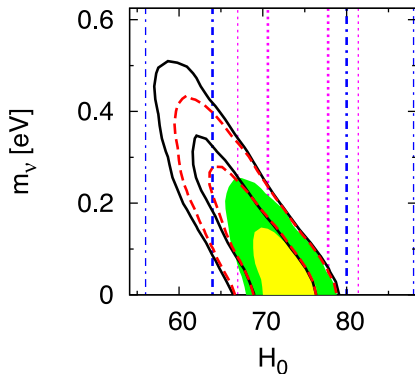
LRG+BAO+WMAP5+SNe

$\Sigma m_\nu < 0.28 \text{ eV}$ (95% CL)

0911.5291

Дмитрий Горбунов (ИЯИ)

CMB+LSS: Planck (2013?)



CMB+Hubble измерения

$\Sigma m_\nu < 0.20 \text{ eV}$ (95% CL)

0911.0976

Стандартная модель: успехи и проблемы

Калибровочные поля (взаимодействия): $\gamma, W^\pm, Z, g$

Три поколения материи: $L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}, e_R; Q = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}, d_R, u_R$

- Описывает

- ▶ все эксперименты с участием сильных и электрослабых взаимодействий

- Не описывает

- ▶ Нейтринные осцилляции
- ▶ Барионная асимметрия
- ▶ Тёмная материя (Ω_{DM})
- ▶ Тёмная энергия (Ω_Λ)
- ▶ Инфляция: $R^2, RH^\dagger H, \dots$
- ▶ CP-проблема в КХД:
нетривиальная топология, ...
- ▶ Иерархия калибровочных масштабов: нет новых
- ▶ Квантовая гравитация

физика частиц

должна объяснять это

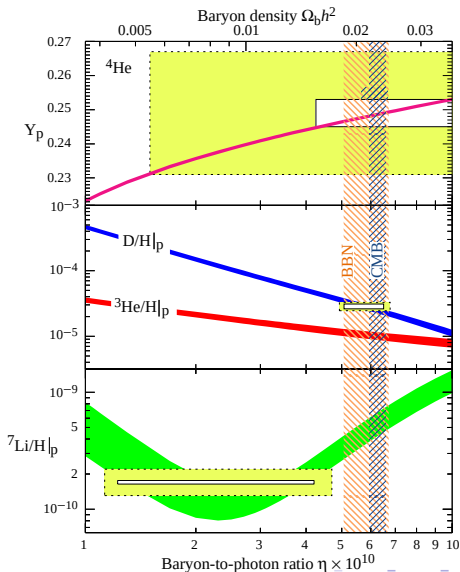
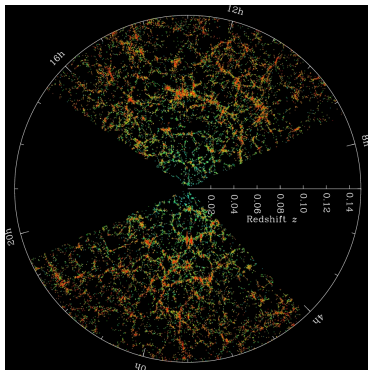
объясняется физикой на масштабе

$E \sim 1/\sqrt{G_N} \sim 10^{19} \text{ ГэВ} ?$

Отсутствие антивещества

Условия Сахарова успешного бариогенезиса

- В (or L)-нарушение
- C- & CP-нарушения
- эти процессы неравновесны



Что заставляет ввести “тёмную материю”?

- **Астрофизические данные**

- ▶ Наблюдения за объектами в галактиках
- ▶ Наблюдения за скоплениями галактик

- **Космологические данные**

- ▶ Обилие структур в современной Вселенной
- ▶ Картина анизотропии реликтового излучения
- ▶ Наблюдение за космологически удалёнными объектами (далеко=давно)
- ▶ Сахаровские осцилляции во взаимном положении удалённых галактик

Измерение скоростей объектов в галактиках

Эффект Доплера

$$\omega = \omega_0 \frac{1 + \frac{v_{\text{приёмник}}}{c_{\text{волн в среде}}}}{1 - \frac{v_{\text{источник}}}{c_{\text{волн в среде}}}}$$

Релятивистское обобщение

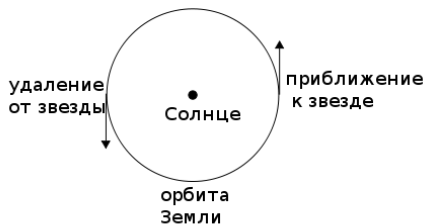
$$\omega = \omega_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta}$$

θ — угол между направлением на источник и его скоростью $\vec{v}$

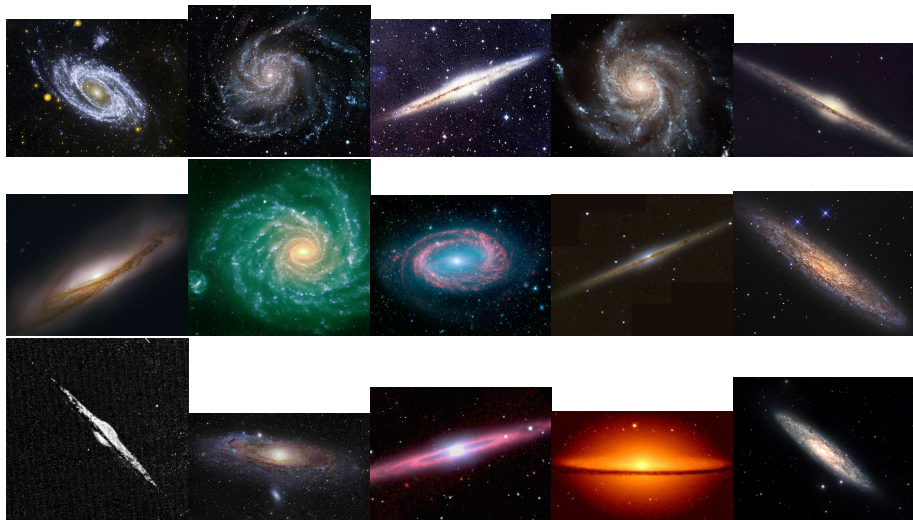
Позволяет найти скорость вращения вне зависимости от скорости центра вращения!



↑
направление
на звезду



Звёзды и облака холодного газа в спиральных галактиках



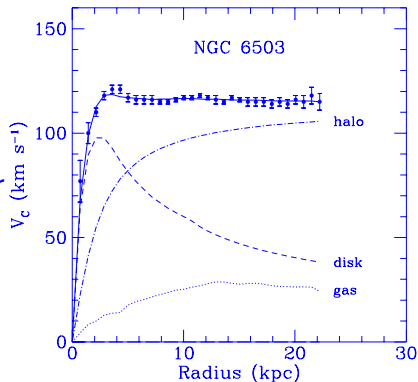
Тёмное гало галактик: пологие “кривые вращения”

$$v(R) = \sqrt{G \frac{M(R)}{R}}$$

$$M(R) = 4\pi \int_0^R \rho(r) r^2 dr$$

1 кpc = 10^3 парсек =

3.3 тыс. св. лет



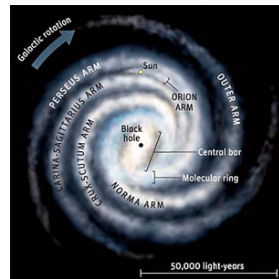
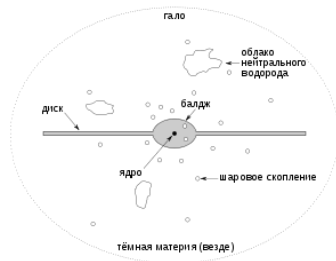
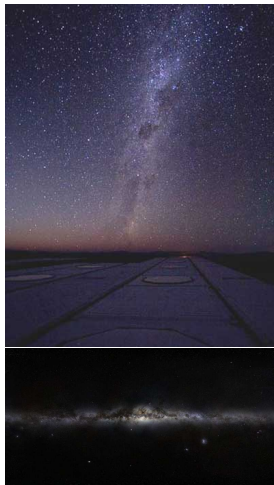
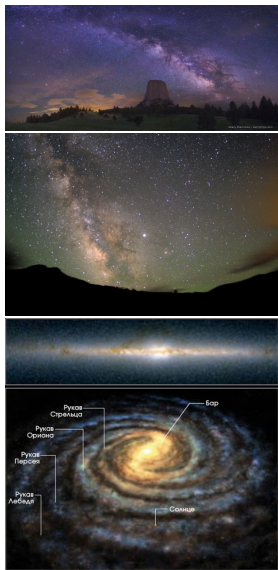
наблюдения:

$$v(R) \simeq \text{const}$$

Видимая материя:

внутренние области $v(R) \propto \sqrt{R}$
 внешние (“пустые”) области $v(R) \propto 1/\sqrt{R}$

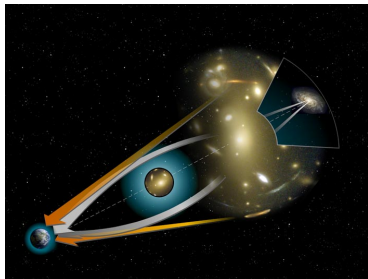
Строение Млечного Пути



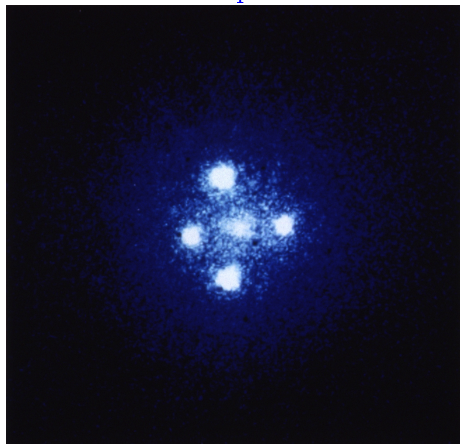
гало также помогает стабилизировать структуру диска ...

Гравитационное линзирование

$$\text{ОТО: } \alpha = 4GM/(c^2 b)$$



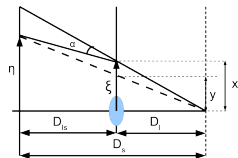
Крест Эйнштейна



источник: квазар $D_s = 8$ млрд. св. лет

линза: галактика $D_l = 0.4$ млрд. св. лет

« » « » ≡



$$\vec{\eta} = \frac{D_s}{D_l} \vec{\xi} - D_{ls} \vec{\alpha}(\vec{\xi})$$

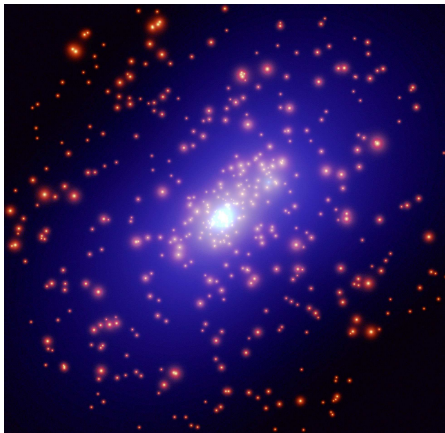
обычная линза
со специфическим
коэффициентом
преломления

$$\vec{\alpha}(\vec{\xi}) = \frac{4G}{c} \int \frac{\vec{\xi} - \vec{\xi}'}{|\vec{\xi} - \vec{\xi}'|^2} d^2 \xi' \int \rho(\vec{\xi}', z) dz$$

Тёмная материя в центре скоплений галактик

гравитационное линзирование

восстановление линзы по изображению



Тёмная материя в скоплениях галактик

X-лучи от горячего газа из центров скоплений

$$\frac{\Delta P}{\Delta R} = -\mu n_e(R) m_p \frac{GM(R)}{R^2}, \quad M(R) = 4\pi \int_0^R \rho(r) r^2 dr, \quad P(R) = n_e(R) T_e(R)$$

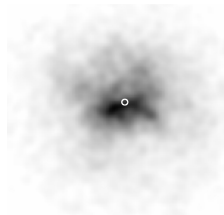
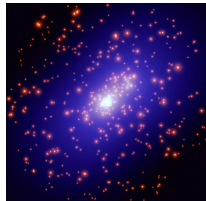
галактики в скоплениях

галактики вириализованы,

$$U + 2E_k = 0$$

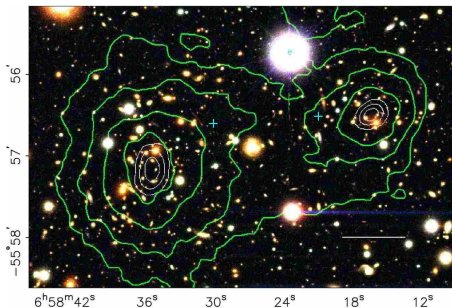
$$3M\langle v_r^2 \rangle = G \frac{M^2}{R}$$

v_r — проекция скорости на луч зрения

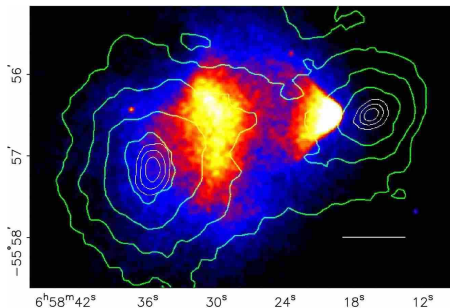


Галактика Млечный путь: движение к центру сверхскопления Девы

Столкнувшиеся скопления (Bullet cluster) 1E0657-558



Гравитационное линзирование



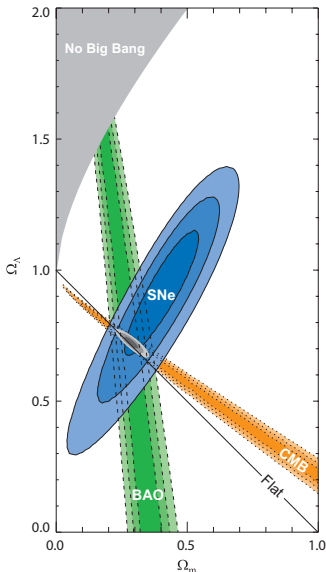
Рентгеновское излучение

$$M \simeq 10 \times m$$

приведён масштаб в 700 тыс. св.лет

скопления удалены на расстояние 5 млрд. св.лет

Данные из космологии



- оценка массы в галактиках, скоплениях и других структурах
- поправки к закону Хаббла : связь между красным смещением и кривыми блеска для “стандартных свеч” (SNe Ia)
- анизотропия РИ, распространённость структур (BAO, и др.)

$$\rho_{\text{энергии}}^{\text{плотность}}(t_0) \equiv \rho_c \approx 0.53 \times 10^{-5} \frac{\text{ГэВ } c^2}{\text{см}^3}$$

вклад РИ:

$$\Omega_\gamma \equiv \frac{\rho_\gamma}{\rho_c} = 0.5 \times 10^{-4}$$

Вклад барионов (водород, гелий):

$$\Omega_B \equiv \frac{\rho_B}{\rho_c} = 0.046$$

Вклад нейтрино:

$$\Omega_\nu \equiv \frac{\sum \rho_{\nu_i}}{\rho_c} < 0.01$$

Вклад тёмной материи:

$$\Omega_{DM} \equiv \frac{\rho_{DM}}{\rho_c} = 0.23$$

Вклад тёмной энергии:

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c} = 0.73$$

Свойства тёмной материи

Если новые частицы (X):

- 1 стабильные на космологических временах ($t \gg 14$ млрд. лет)
- 2 нерелятивистские (иначе покинут галактики!
Млечный путь: $v_X \sim v_{\text{звёзды}} \sim 10^{-3} c \simeq 300 \text{ км/с}$)
- 3 (почти) бесстолкновительны
- 4 (почти) электрически нейтральны

(квантовое!) условие локализации в галактиках:

волна де Бройля

$$\lambda = h/(M_X v_X), \quad \lambda \lesssim L_{\text{галактика}} \rightarrow$$

для бозонов

$$M_X \gtrsim 3 \times 10^{-22} \text{ эВ}/c^2$$

для фермионов

$$M_X \gtrsim 750 \text{ эВ}/c^2$$

принцип Паули: 1 состояние $\leq$ 1 частица

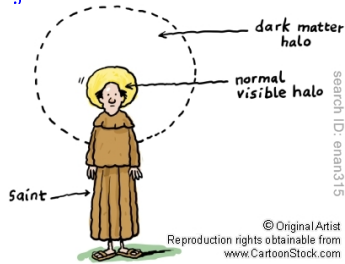
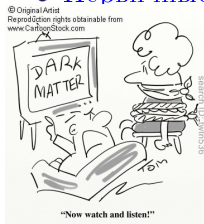
$$f(\mathbf{p}, \mathbf{x}) = \frac{\rho_X(\mathbf{x})}{M_X} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi} M_X v_X\right)^3} \cdot e^{-\frac{\mathbf{p}^2}{2M_X^2 v_X^2}} \bigg|_{\mathbf{p}=0} \leq \frac{g_X}{h^3}$$

Астрофизика и космология

- ❶ Частицы тёмной материи (модель)
- ❷ Открытие частиц тёмной материи (не гравитация)
- ❸ И/Или модифицированная гравитация
- ❹ Механизм бариогенезиса...?
- ❺ гравитационные волны
- ❻ реликтовые гравитационные волны
- ❼ инфляция в ранней Вселенной
- ❽ послеинфляционный разогрев?

Кандидаты в частицы тёмной материи

- WIMPs (нейтралино, ...) Натуральное, но почему тяжёлое???
- стерильные нейтрино Увы: Не seesaw !!!
- аксион
- гравитино, аксино Весьма сильно ограничены
- Тяжёлые реликты Если нестабильны, то UNECRs ???
- Зеркальные барионы В основном в тёмных звёздах
- (Топологические) дефекты
- Massive Astrophysical Compact Halo Objects
- Первичные чёрные дыры (остатки)



Тёмная материя: Прямые поиски

- WIMPs (нейтралино, ...) энергия отдачи, (LHC, Baksan, PAMELA, ...)
- стерильные нейтрино линия: $\nu_s \rightarrow \nu_a + \gamma$, (XMM, INTEGRAL, ...)
- лёгкое скалярное поле
- аксион конвертация $a + \mathbf{B} \rightarrow \gamma$
- гравитино, аксино потеря энергии & LHC, ...
- Тяжёлые реликты если нестабильны: космические лучи
- Зеркальные барионы Ops-Ops', n-n' осцилляции
- (Топологические) дефекты лензирование РИ
- Massive Astrophysical Compact Heavy Objects микролинзирование
- Первичные чёрные дыры (остатки?) космические лучи

Что интересно объяснить?

- $\Lambda \ll M_{Pl}^4, M_W^4, \Lambda_{QCD}^4$?
- $\Omega_\Lambda \neq 0$?
- $\Omega_B \sim \Omega_{DM} \sim \Omega_\Lambda$?
- $\frac{\delta T_{CMB}^2}{T_{CMB}^2} \sim \Delta_B \sim 10^{-10}$?
- $\theta G_{\mu\nu} G_{\lambda\rho} \epsilon^{\mu\nu\lambda\rho}, \theta < 10^{-9}$?
- $m_e \ll m_\tau \ll m_{top}$?
- ...
- Иерархия масштабов взаимодействий $M_W \ll M_{Pl}$?
- Квадратичные расходимости — стабильность электрослабого вакуума

